

# VI CONGRESO IBÉRICO de AgrolIngeniería

5 a 7 de Septiembre | 2011  
Universidade de Évora | Portugal



## Diseño de silo experimental para el estudio de sistemas de protección frente a las explosiones de polvo

Á. Ramírez<sup>1</sup>, A. Tascón<sup>2</sup>, J. García-Torrent<sup>3</sup>, Á. Vega<sup>3</sup>, P. Aguado<sup>4</sup>, F. Ayuga<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación EIPIRMA. Universidad Politécnica de Madrid. España. E-mail: alvaro.ramirez@upm.es; francisco.ayuga@upm.es

<sup>2</sup> Grupo de Investigación INRUMA. Dpto. Agricultura y Alimentación. Universidad de La Rioja. España. E-mail: alberto.tascon@unirioja.es

<sup>3</sup> Grupo de Investigación SIATEX. Laboratorio Oficial Madariaga. Universidad Politécnica de Madrid. España. E-mail: javier.garcia@upm.es; angel.vega@upm.es

<sup>4</sup> Grupo de Investigación INRUMA. Dpto. Ingeniería y Ciencias Agrarias. ESTI Agraria. Universidad de León. España. E-mail: pedro.aguado@unileon.es

### Resumen

A continuación del título y autores, se incluirá un Resumen sinóptico del trabajo, de unas 150 a 200 palabras (TNR 10 ptos.). El resumen irá en español o portugués y además en inglés.

**Palabras Clave:** Silo, explosión de polvo, diseño, venteo.

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando un material orgánico está suficientemente dividido y puesto en suspensión formando una nube de polvo, da lugar a una atmósfera potencialmente explosiva si la concentración es la adecuada (Eckhoff, 2003). Este es un caso frecuente en industrias agroalimentarias y en silos de almacenamiento, donde operaciones como el transporte, carga y descarga pueden generar nubes de polvo capaces de desencadenar explosiones con cuantiosas pérdidas humanas y materiales.

La ignición de la nube de polvo desencadena reacciones exotérmicas que producen un rápido aumento de la presión hasta valores de 7-10 bar (700-1000 kPa), si es un espacio confinado y no hay instalado ningún sistema de protección.

La legislación europea establece a través de dos Directivas las condiciones que deben cumplir los equipos a instalar en zonas con atmósferas potencialmente explosivas (ATEX 94/9/CE, 1994) y las condiciones de seguridad para los trabajadores (ATEX 1999/92/CE, 1999). Estas Directivas reciben el acrónimo coloquial de ATEX (ATmosphère EXplosible) y constituyen el marco legal al que deben ajustarse todas las empresas en Europa.

El sistema de protección básico contra explosiones en silos son los dispositivos de venteo, los cuales permiten liberar al exterior de forma controlada mediante su rotura la energía generada en la reacción de combustión del polvo.

Durante la década de los ochenta y noventa, han sido varios los investigadores que han contribuido al conocimiento de las explosiones de polvo en silos mediante la realización de ensayos de explosión. Entre estos ensayos destacan los realizados por Eckhoff en un silo de 500 m<sup>3</sup> (Eckhoff, 1984); y en uno de 236 m<sup>3</sup> (Eckhoff, 1988); los realizados por Bartknecht

en 20 m<sup>3</sup> (1985); los ensayos de Siwek en 10, 25 y 250 m<sup>3</sup> (Siwek, 1989); los experimentos de Tamanini en 63,7 m<sup>3</sup> (Tamanini, 1996); Deng en 95 m<sup>3</sup> (Deng, 1993); Hattwig y Hensel en silos de sección cuadrada de 45 y 85 m<sup>3</sup> (Hattwig, 1993); y los realizados por Eibl, Nars, Leuckel y Hochst en 50 m<sup>3</sup> (Höchst, 1998).

Sin embargo, en la actualidad persisten las dificultades técnicas y económicas para proteger adecuadamente los silos agrarios (Tascón, 2009a). Por otro lado, trabajos recientes (Tascón, 2009b) han resaltado las discrepancias significativas que hay entre la norma europea (EN 14491, 2006) y la norteamericana (NFPA 68, 2007) a la hora de dimensionar las áreas de venteo necesarias para proteger un determinado silo. Por ello es necesario seguir investigando para conocer mejor el proceso de la explosión y del venteo, con el fin último de encontrar reglas para el diseño óptimo de los silos y de sus protecciones. El desarrollo de nuevos métodos de cálculo permitiría perfeccionar la normativa vigente en la actualidad, que está en constante proceso de revisión para así poder incorporar los progresos que se van alcanzando en la materia.

La tecnología del polvo juega un papel fundamental a la hora de comprender los diferentes procesos implicados: dispersión del polvo y formación de nubes, su ignición, la explosión y el venteo (Eckhoff, 2008). La complejidad de estos procesos, junto con la gran variedad de situaciones que pueden presentarse en la realidad, hace necesario profundizar en el estudio de esta materia mediante la experimentación.

El objetivo principal de este trabajo es el diseño de un silo experimental concebido para el ensayo de explosiones de polvo venteadas. Este equipo permitirá avanzar en el conocimiento de todas las variables que intervienen en el fenómeno de la explosión y del venteo; y también avanzar en el diseño de dispositivos de protección más eficaces. Gracias a su diseño modular se pretende disponer de una herramienta abierta a multitud de posibilidades de ensayo, pudiendo variar factores con gran influencia en el desarrollo de la explosión, como el área de venteo, el volumen del silo y su relación altura/diámetro (L/D).

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SILO EXPERIMENTAL

El diseño del silo se ha realizado siguiendo las recomendaciones de las normas UNE en cuanto a especificaciones de los materiales (UNE-EN 13445-2, 2010), especificaciones de diseño de envolventes, fondos y bridas (UNE-EN 13445-3, 2010), conceptos de diseño de equipos resistentes a la explosión (UNE-EN-14460, 2006) y también el Documento Básico de Seguridad Estructural (CTE DB SE, 2006).

### 2.1 Cuerpo del silo

El diseño propuesto es un silo de sección circular compuesto por 4 módulos de 1,6 metros de longitud y 2 metros de diámetro consiguiendo un volumen aproximado por módulo de 5 m<sup>3</sup> (Fig. 1). La envolvente será fabricada en acero P265GH y contará con un espesor nominal de 12 mm que permitirá soportar 10 bares (1000 kN/m<sup>2</sup>) (1 MPa) de presión nominal sin deformaciones.

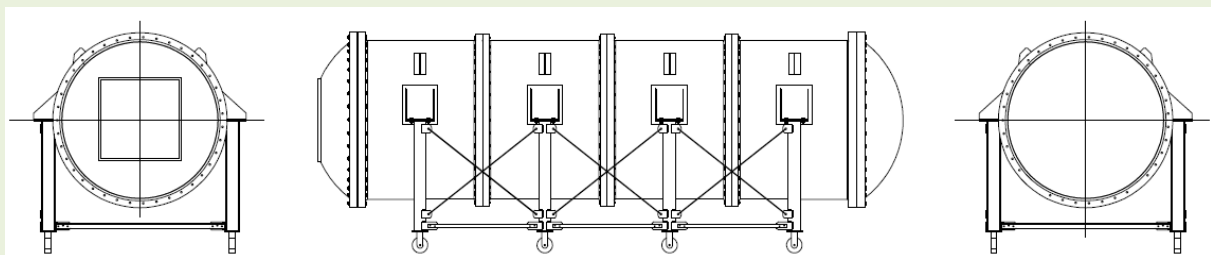
Las virolas estarán unidas entre sí mediante un sistema de bridas normalizadas, también de sección circular, provistas de juntas ignífugas y unidas mediante tonillería 8.8. El material de fabricación para el conjunto brida-tornillo-tuerca será acero S275JR.

Respecto a los fondos, serán de dos tipos: Uno de los extremos será del tipo Klopper, fabricado también con acero P265GH de 12 mm de espesor y ciego. En el otro extremo del

silo tendremos un fondo con las mismas características constructivas que el anteriormente citado pero con una apertura, plana y reforzada, de  $1 \times 1 \text{ m}^2$  con un triple objetivo:

- Permitir el atornillamiento del marco donde se colocarán los paneles de venteo que se quieran ensayar.
- Permitir el atornillamiento de una base de acero cuya misión sea modificar el área de venteo con el objeto de poder realizar ensayos para distintas áreas de venteo.
- Permitir la entrada para labores de limpieza y mantenimiento.

Tal y como ocurre en la unión entre virolas, estos fondos irán provistos de bridas, de idénticas características a las expuestas anteriormente, para permitir su unión con la envolvente.



*Figura 1. Croquis del silo experimental modular. Vista frontal, lateral y trasera.*

## **2.2 Estructura de apoyo del silo**

El silo será colocado en posición horizontal, descansando cada virola sobre dos pilares. Toda la estructura de apoyo, constituida por pilares, arriostramientos, cartelas y placas, será fabricada en acero S275JR.

Los pilares serán perfiles HEB-160 e irán soldados en su parte superior a unas placas de dimensiones  $360 \times 340 \times 10 \text{ mm}$ .

Mediante la soldadura de una placa de refuerzo de  $460 \times 500 \times 10 \text{ mm}$  a cada virola, dos cartelas de 390 mm de altura, 10 mm de espesor y forma triangular que conectan esta placa con un soporte horizontal, conseguimos una estructura estable. Estos soportes horizontales del silo tendrán unas dimensiones de  $360 \times 340 \times 10 \text{ mm}$ , irán soldados a la envolvente y servirán, además de como soporte, para atornillar el conjunto pilar-placa descrito anteriormente.

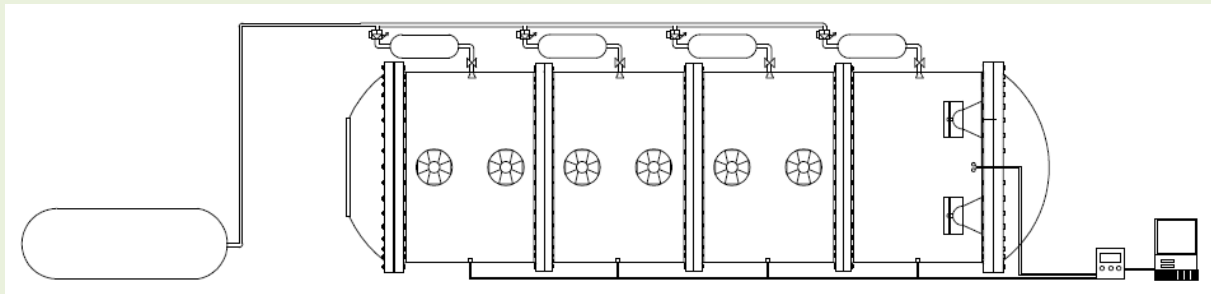
Para conseguir rigidizar totalmente la estructura se dispondrá un arriostramiento en el plano longitudinal del silo basado en un perfil L 45.5 atornillado a una pletina de 10 milímetros de espesor que irá soldada en la parte inferior de cada uno de los soportes. Además el arriostramiento se completa con dos tirantes de acero, de  $180 \text{ mm}^2$  de área neta, atados a una pletina de menores dimensiones que las descritas anteriormente. En el plano transversal al silo, el arriostramiento se conseguirá mediante el atornillado de un perfil L60.5 a unas pletinas idénticas a las empleadas para atornillar la barra en el arriostramiento según el plano del silo.

Para facilitar en gran medida la retirada y manejo de las virolas, se diseñan unas orejas para izarlas con la ayuda de una grúa. Estas orejas disponen también de una placa de refuerzo soldada a la envolvente de  $270 \times 150 \times 10 \text{ mm}$  y contarán con un espesor de 10 mm. Sus dimensiones irán condicionadas al tipo de gancho que se vaya a utilizar.

Como el silo se situará en el interior de una nave para protegerlo de las inclemencias del tiempo, debe ser sencillo de mover para poder sacarlo al exterior a la hora de realizar los ensayos de explosión. Con este fin se dispondrán en la base de los pilares unas ruedas de alta resistencia capaces de soportar el peso del conjunto, con un diámetro de 250 mm, núcleo de acero y banda de poliuretano. En la parte superior de dichas ruedas se dispone una placa de acero que irá atornillada a otra de características similares soldada a la parte inferior de los pilares.

### 2.3 Sistema de inyección de polvo

El sistema de inyección de polvo en el interior del silo tiene la misión de generar la nube de polvo necesaria para realizar los ensayos (Fig. 2). Será similar al empleado en el silo experimental alemán de 50 m<sup>3</sup> (Höchst S., 1998). Dicho sistema consiste en la inyección de polvo mediante botellas presurizadas a 10 y 20 bar y boquillas dispersoras en el interior del silo.



*Figura 2. Croquis del silo experimental modular. Sistema de inyección de polvo e instrumentación*

Para conseguir la inyección es necesaria la instalación de un compresor que sea capaz de presurizar todas las botellas. Una vez alcanzada la presión necesaria, y mediante la apertura de válvulas de apertura rápida, se introducirá el polvo en el silo dispersándolo mediante boquillas diseñadas para tal fin, similares a las utilizadas en los ensayos normalizados de explosión en 1 m<sup>3</sup> (UNE-EN 14034-1, 2005) u otros diseños. Para conseguir llevar aire a presión a los depósitos de polvo se instalará un sistema de tuberías de goma para aire comprimido.

Cada módulo podrá ser conectado a una botella presurizada, cuyo contenido de polvo podrá ser variado de manera que se puedan conseguir diferentes concentraciones de polvo dentro del silo. Para almidón de maíz la concentración aproximada que produce los valores de sobrepresiones más elevados es de 500 g/m<sup>3</sup> (Eckhoff, 2003).

En la salida de cada botella se colocará una válvula de apertura rápida y a la entrada una válvula reguladora de presión.

### 2.4 Instrumentación

El parámetro principal a medir en los ensayos de explosión venteadas es la sobrepresión alcanzada y estudiar como varía cuando se modifica alguna variable: volumen, relación altura/diámetro, área de venteo, concentración de polvo, retardo de la ignición, etc.

Para poder medir las presiones generadas en una explosión, ~~que es un proceso extraordinariamente rápido~~ **que es un fenómeno rápido**, ~~necesitaremos un instrumental capaz de aportar suficientes mediciones con una alta frecuencia de medida y con una precisión suficiente~~ **se precisará un sistema de adquisición de datos de alta velocidad y suficiente resolución -16 bits-.**

El equipo de medida constará de 4 sensores de presión, distribuidos estratégicamente a lo largo del silo (Fig. 2), conectados a un data-logger capaz de suministrar mediciones a una unidad de control o PC. Los sensores serán de tipo piezo-resistivos, modelo 4043 de la marca Kistler y capaces de trabajar en un rango de presión de 0 a 10 bar. Podrán soportar altas temperaturas mayores e irán instalados en el silo mediante un sistema de rosca M14x125.

El data-logger se trata del modelo Traveller CF de la casa ESAM. Cuenta con una velocidad de muestreo de 250 kS/s, banda pasante de 10 kHz, posibilidad de conexión de puentes Wheatstone y trigger analógico.

Para la ignición de la nube de polvo se utilizarán cerillas químicas. Los valores normalizados (UNE-EN 14034-1, 2005) son de 10 kJ, pero también se puede estudiar el efecto de la intensidad de la energía de ignición sobre la sobrepresión generada utilizando fuentes de ignición distintas.

### **3. POSIBILIDADES DE INVESTIGACIÓN QUE OFRECE EL SILO**

El carácter modular del silo abre un amplio abanico de posibilidades a la hora de poder realizar ensayos en distintos volúmenes y distintas relaciones altura/diámetro. Hasta ahora ningún silo experimental ha ofrecido la posibilidad de variar estas condiciones de forma tan rápida y sencilla como el definido en este trabajo.

Las investigaciones que se pueden realizar en el silo son las siguientes:

- Ensayos de explosión en condiciones normalizadas (UNE-EN 14034-1, 2005) definiendo como variable el volumen del silo y la relación L/D para profundizar en su influencia sobre la presión generada.
- Ensayos de explosión en condiciones normalizadas, para un determinado volumen y relación L/D, definiendo como variable el área de venteo, para estudiar su relación con la presión generada y comparar con las normas de dimensionamiento de venteos. Dado el carácter modular del silo habría 4 configuraciones distintas (desde un módulo hasta 4 módulos) en las que ensayar distintas áreas de venteo.
- Ensayos de explosión en condiciones normalizadas, para un determinado volumen y relación L/D, utilizando distintos dispositivos de venteo, incluyendo diseños novedosos. Dado el carácter modular del silo habría 4 configuraciones distintas en las que ensayar dichos dispositivos de venteo.
- Ensayos de explosión en condiciones normalizadas variando las condiciones del polvo, como por ejemplo su humedad, granulometría o uniformidad en la dispersión.
- Ensayos de explosión en condiciones distintas de las normalizadas, variando la concentración o la turbulencia de la nube de polvo con respecto a las definidas para el equipo normalizado, para estudiar su efecto sobre la presión generada.

- Ensayos de dispersión del polvo dentro del equipo, sin haber ignición ni explosión, para estudiar diversos diseños o condiciones de dispersión y conocer mejor cómo se comportan las nubes de polvo que se van a ensayar.

Además, si en un futuro se disponen en el silo dispositivos de medida de la concentración de polvo y de la velocidad del aire (Hauert, 1996) se podrá estudiar con precisión las características de las nubes de polvo generadas previas a la explosión. Ello permitiría realizar todos los ensayos anteriores para diversas condiciones, distintas de las normalizadas, y abriría la posibilidad de llegar a relacionar la violencia de la explosión, y el área de venteo necesaria, con las condiciones que haya dentro del equipo real a proteger.

Por último, hay que resaltar que en un futuro sería posible añadir algún módulo más ampliando el silo, consiguiendo de esta manera mayor volumen y relación L/D.

#### **4. CONCLUSIONES**

Este trabajo presenta el diseño de un silo experimental de acero para la realización de ensayos de explosión de polvo. El equipo será modular, lo cual permitirá variar fácilmente el volumen del equipo y de esta forma tener una gran flexibilidad de trabajo.

El equipo se ha diseñado de manera que se pueda estudiar el efecto de todos los parámetros que influyen en la presión generada por una explosión: volumen, relación L/D, área de venteo, tipo de venteo, energía de ignición y características de la nube de polvo.

Este silo permitirá conocer mejor el proceso de explosión y de venteo en un volumen considerable, inicialmente desde 5 m<sup>3</sup> hasta 20 m<sup>3</sup>, con el objeto de contribuir a resolver las dificultades e incógnitas que todavía persisten en el protección de los silos agrarios frente a las explosiones de polvo.

En este trabajo han participado de manera coordinada tres grupos de investigación con miembros expertos en silos, materiales granulares y explosiones, pertenecientes a diversas Universidades españolas.

#### **5. AGRADECIMIENTOS**

Los autores muestran su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación recibida a través del Programa Nacional de I+D+i, proyecto AGL2009-13181-C02.

#### **6. BIBLIOGRAFIA**

ATEX 94/9/EC (1994) *Directive 94/9/EC on the approximation of the laws of the member states concerning equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres.*

ATEX 1999/92/EC (1999) *Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres.*

Bartknecht W. (1985) *Effectiveness of explosion venting as a protective measure for silos. Plant/Operations Progress*, Vol. 4, 4-13.

CTE DB SE (2006). *Documento Básico Seguridad Estructural. Código Técnico de la Edificación*. Ministerio de la Vivienda, España.



- Deng X., Zang J, Xie L. (1993) *Maize dust explosions in the 94,4 m<sup>3</sup> experimental silo for venting or deflagrations in low strength silos. Proc. 5th Int. Coll. Dust Explosions.* Abril 1993, Pultusk, Polonia.
- Eckhoff R. K., Fuhre K. (1984) *Dust explosion experiments in a vented 500 m<sup>3</sup> silo cell. J. Occup. Accid.*, Vol. 6, 229-240.
- Eckhoff R. K., Alfert F., Fuhre K., Pedersen G. H. (1988) *Maize starch explosions in a 236 m<sup>3</sup> experimental silo with vents in the silo wall. J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 1, 16-24.
- Eckhoff R.K. (2003) *Dust explosions in the process industries*, Gulf Professional Publishing/Elsevier, Amsterdam.
- Eckhoff R.K. (2008). *Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, pp. 105-116.
- EN 14491 (2006). *Dust explosion venting protective systems.* CEN.
- Hattwig M., Hensel W. (1993) *Applicability of the new VDI-guideline 3673 to silos of rectangular geometry. 5th Int. Coll. Dust Explosions.* Abril 1993, Pultusk, Polonia.
- Hauert F., Vogl A., Radant, S. (1996) *Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in silos. Process Saf. Prog.*, Vol.15 (3), 178-184.
- Höchst S., Leuckel W. (1998). *On the effect of venting large vessels with mass inert panels. J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 11 (2), 89-97.
- NFPA 68 (2007). *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting.* National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA.
- Siwek R. (1989) *Drukentlastung von Staubexplosionen beim pneumatischen Befüllen von Behältern. VDI-Berichte 701*, Verein Deutscher Ingenieure, Dusseldorf.
- Tamanini F., Valiulis J. (1996). *Improved guidelines for the sizing of vents in dust explosions. J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 9 (1), 105-118.
- Tascón, A. (2009a) *Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional al estudio de las explosiones de polvo en silos y su protección mediante venteos.* Tesis doctoral. Dpto. Ingeniería y Ciencias Agrarias. Universidad de León.
- Tascón, A., Aguado, P.J, Ramírez, A. (2009b) *Dust explosion venting in silos: A comparison of standards NFPA 68 and EN 14491. J. Loss Prev. Process Ind.*, Vol. 22, 204-209.
- UNE-EN 14034-1 (2005) *Determinación de las características de explosión de nubes de polvo. Parte 1: Determinación de la presión máxima de explosión  $p_{máx}$  de nubes de polvo.* AENOR.
- UNE-EN 14460 (2006) *Equipos resistentes a las explosiones.* AENOR.
- UNE-EN 13445-2 (2010) *Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 2: Materiales.* AENOR.
- UNE-EN 13445-3 (2010) *Recipientes a presión no sometidos a llama. Parte 3: Diseño.* AENOR.